

## **ТВОРЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ В. Е. ГРУМ–ГРЖИМАЙЛО В НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МОСКОВСКОЙ ШКОЛЫ ТЕПЛОТЕХНИКОВ МИСиС**

«Искусство строить и управлять печами умерло,  
как искусство – оно обратилось в науку»  
В.Е. Грум–Гржимайло, 1925 г.

Так уж сложилось исторически: в науке о печах можно выделить определенные этапы. Великий В. Е. Грум–Гржимайло писал в 1925 г., что «основателем гидравлической теории движения пламени в печах является Михаил Васильевич Ломоносов» и далее «я создал гидравлическую теорию движения пламени. Мой товарищ, профессор Ленинградского Политехнического института Иосиф Гаврилович Есьман дал математическое выражение этой теории, и с тех пор дело встало на рельсы».

Гидравлическая теория печей В. Е. Грум–Гржимайло включала в себя двадцать пять утверждений и научных положений, основанных на многолетнем опыте проектирования, строительства, эксплуатации и ремонта печей. Эта теория в то время не охватывала множества вопросов и сложнейших процессов, протекающих в печах, но она была первой теорией печей.

В последующем эта теория критиковалась, рождались новые теории: тепловая теория Н. Е. Скаредова – И. Д. Семикина (1911–1930), общая теория Н. Н. Доброхотова (1923–1929), энергетическая теория Н. Н. Доброхотова – И. Д. Семикина (1935–1945), комплексная теория Д. А. Диомидовского (1956).

В настоящее время в науке о печах занимает лидирующее место созданная профессором Марком Алексеевичем Глинковым общая теория печей, окончательно сформировавшаяся к 1962 году. Она сформировалась на основе достижений таких наук, как механика жидкостей и газов, тепломассообмен, теория горения, теория генерации теплоты из других видов энергии и др. Совершенно очевидно, что коллектив кафедры, которую профессор М. А. Глинов возглавлял в течение тридцати лет с 1945 по 1975 годы, его ученики и последователи в настоящее время продолжают творчески решать вопросы металлургической теплотехники, используя научное наследие как первого основателя науки о печах профессора В. Е. Грум–Гржимайло, так и основателя общей теории печей профессора М. А. Глинова.

Основными направлениями научной деятельности коллектива кафедры «Теплофизика и экология металлургического производства» НИТУ «МИСиС» являются:

- создание рациональных теплотехнических условий для протекания технологических процессов в черной и цветной металлургии, машиностроении, производстве огнеупорных и теплоизоляционных материалов и других отраслях промышленного производства;
- математическое моделирование и исследование процессов гидро- и газодинамики и теплообменных процессов в зонах генерации теплоты и зонах технологического процесса промышленных печей;
- разработка и исследование тепловой работы нагревательных устройств, использующих высокоинтенсивные процессы сжигания топлива и переноса теплоты;
- совершенствование конструкций, тепловых и температурных режимов нагрева металла на основе промышленного эксперимента;
- энергоэкологический анализ эффективности технологических процессов металлургического производства и определение способов энергосбережения и снижения энергоемкости производимой продукции;
- разработка мер по снижению вредного воздействия выбросов производства в окружающую среду.

Своеобразным смотром научно-технической работы коллектива кафедры являются международные научно-практические конференции. В работе конференций приняли участие более 450 специалистов из 40 организаций 18 стран мира (Великобритания, Белоруссия, Бельгия, Болгария, Германия, Казахстан, Латвия, Литва, Румыния, Россия, Украина, Франция и др.) На конференциях были представлены крупные металлургические предприятия черной металлургии России и стран СНГ: ММК, НЛМК, Северсталь, НТМК, Мариупольский МК им. Ильича, «Красный Октябрь», Чусовской МЗ и др. Составной частью конференций являлись работы выставок «Печестроение: конструкции, огнеупоры, приборы и системы контроля, АСУ ТП», в которых приняло участие 24 ведущих фирм и организаций, издательств и журналов Steel Times International и Furnaces International. Содержательная часть научных докладов представляет собой оригинальные исследования в области математического моделирования аэродинамических и теплообменных процессов в печах производства чугуна и стали, нагревательных и термических печах, в области энергосбережения, совершенствования тепловых и температурных режимов печных агрегатов, их автоматизации, снижения количества вредных выбросов и защиты окружающей среды.

На кафедре на основе современных программно-вычислительных комплексов (ПВК) разрабатывались детерминированные математические модели тепломассообменных процессов, процессов движения газов, горения топлива в рабочем пространстве топливных печей. Математическое моделирование с выполнением последующих вычислительных процедур процесса дожига горючих компонентов с помощью вихревого радиационного инжектора (ИВР) позволило предложить ряд дожигательных устройств, ориентированных на различные технологические процессы, в частности, на дожигание СО в дуговых сталеплавильных печах, а также в топливных нагревательных печах при использовании технологии двухстадийного сжигания топлива. Результаты работы, позволившие рассчитать распределение скоростей, давления, температуры и концентраций компонентов смеси, определить конфигурацию зоны горения и решить внешнюю задачу теплообмена, реализованы при проектировании ДСП–12 в условиях ОАО «ВКМ-Сталь» (г. Саранск).

В рамках хоздоговорной темы по заказу ОАО «ГМК «Норильский никель» разработана и внедрена в производство система непрерывного контроля и диагностики параметров технологического и теплового процессов в печи взвешенной плавки. Для этого создана математическая модель процесса и программа, ее реализующая, а также система датчиков, поставляющих необходимую текущую информацию. Созданная система прошла лабораторные, полупромышленные и промышленные испытания и принята в промышленную эксплуатацию на медеплавильном заводе «Надежда» Заполярного филиала ГМК «Норильский никель». Она позволяет непрерывно контролировать температурный и тепловой режим в объеме реакционной шахты печи, прогнозировать параметры и качество продуктов плавки на выходе из шахты, а также изменение температурного режима и качества расплава в случае изменения химического состава шихты и дутья и их расхода. Система отслеживает также состояние огнеупоров в ограждениях шахты и наличие гарнисажа на поверхностях кессонов, установленных в этих ограждениях.

В условиях ОАО «Северсталь» (стан 2000) совместно с ЦНИИЧермет им. Бардина проводились работы по ускоренному охлаждению горячекатаных рулонов низкоуглеродистых (конструкционных) и низколегированных углеродистых (трубных) марок стали и замедленному охлаждению рулонов сложнолегированных марок стали.

Изготовлены и успешно запущены в эксплуатацию два стенда ускоренного охлаждения, используемые для срочных и ответственных заказов. ОАО «Северсталь» выделило средства для изготовления 27 стендов, что позволяет прогнозировать использование ускоренного охлаждения для 20–30 % прокатываемого в ЛПЦ–2 металла (до 1,5 млн.т/год).

Ускоренное охлаждение рулонов имеет целью сокращение времени пребывания металла в цехе (до начала работ охлаждение рулонов на складе составляло более 97 % времени пребывания металла в цехе горячей прокатки). Экономический эффект при этом заключается в резком ускорении движения оборотных средств, особенно заметном в случае ЛПЦ–2, более половины продукции которого является не подкатом, а готовым изделием, подлежащим немедленной отгрузке потребителю.

Кроме того, грамотно организованное ускоренное охлаждение позволяет сократить температурный градиент в рулоне, что способствует выравниванию механических свойств по длине полосы. Этот фактор имеет значение для трубных марок стали, в которых структурные изменения не прекращаются при температуре смотки, а продолжают в процессе охлаждения рулона.

Применительно к печам с жидкой ванной исследовались процессы плавления стального лома в жидком чугуна и механизмы перехода стали в железоуглеродистый расплав, определялась оптимальная скорость ввода порошковой проволоки с силикокальциевым наполнителем в ковш с жидкой сталью.

Проведены комплексные исследования электрических одностопных колпаковых печей на заводе фирмы «TECHNOSTEEL» в г. Яссы (Румыния). Разработана методика комплексного исследования температурных режимов работы данных печей. Разработаны статистические модели процесса отжига и контроля температуры в отдельных точках рулонов и садки. Создана и внедрена конструкция нового конвекторного кольца. Разработаны и внедрены усовершенствованные режимы отжига, которые обеспечили повышение производительности стенда на 15–18 %.

Сотрудниками кафедры разработан метод контроля содержания кислорода в атмосфере нагревательных печей станов горячей прокатки. Создана конструкция отборного зонда, обеспечивающего подачу контролируемой атмосферы из печи к датчику. Данными установками оснащены 2 печи стана 2000 (ЛПЦ–10) и одна печь стана 2500 (ЛПЦ–4) ОАО «ММК». На каждом стане установлена система автоматического сбора и анализа получаемой информации на базе персональных компьютеров.

Исследовано тепловое состояние и потери металла с угаром при организации горячего посада непрерывно-литых слабов в нагревательные печи широкополосных станов в неблагоприятных условиях конкретного производства, когда возникает необходимость их транспортировки и длительного хранения.

Решением задачи теплопроводности для составной пластины с учетом процесса окиснообразования рассчитаны температурные поля и толщины слоя окислы в различные периоды времени для упаковки из двух слабов при транспортировке и стопы слабов при хранении в копильнике.

В условиях различных ритмов работы сталеплавильного и прокатного цехов и возникающей в связи с этим необходимостью длительного хранения слабов было предложено экранирование слабов при транспортировке и хранении в копильнике.

Показано, что даже в случае неблагоприятных условий на конкретном производстве и необходимости длительного хранения слабов перед прокаткой можно разработать эффективную технологию горячего посада непрерывно-литых слабов в нагревательные печи.

Продолжены работы по исследованию ускоренного нагрева металла перед прокаткой с использованием высокоскоростных струй продуктов сгорания топлива. Показано, что закрученные веерные струи позволяют свести к минимуму локальность подвода теплоты и связанную с этим неравномерность прогрева металла.

В процессе работы по энергоэкологическим основам теплотехнического и природоохранного оборудования металлургических технологий будущего выявлены связи энергетических и экологических показателей на уровне конкретных производств, отрасли и страны, определена концепция нормативов энергоэкологических показателей, рассмотрены основные составляющие «глобальной» энергетической оценки новых технологий и производств. Одним из выводов данной фундаментальной работы предлагается за основу энергоэкологического анализа новых технологических схем и производств выбирать энергетический анализ. По результатам энергетического анализа может быть оценена и косвенная экологическая нагрузка.

В рамках единого государственного заказа проводилась фундаментальная НИР по разработке концепции установления технических нормативов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу металлургического производства на основе его энергоэкологических показателей.

Проведен анализ концепций установления технических нормативов выбросов загрязнения веществ в атмосферу и предложена методология разработки технических нормативов, в частности, рассмотрена методика экологического нормирования атмосферных выбросов на основе регистрации параметров лесных экосистем в окрестностях металлургических комбинатов, деградировавших под воздействием токсической нагрузки. Проведены экспериментальные исследования в окрестности Ленинградской атомной станции и проведен этап исследований в окрестностях Курской атомной станции. Результаты этих работ позволяют прояснить вопрос о стимулировании растительности малыми дозами радиации. Кроме того, завер-

шено исследование микроэлементного состава фоновых поверхностных вод озер Национального парка «Себежский».

На дуговых сталеплавильных печах ЗАО «Волгоградский металлургический завод «Красный октябрь» проведены работы по анализу газовыделения из этих печей с целью выбора более рациональной и эффективной системы очистки газов. Необходимость данной работы вызвана тем, что в последние годы существенно возросла топливная составляющая в энергетическом балансе этих печей (газокислородные горелки, применение кислорода, вдувание к концу расплавления порошкообразного углерода, увеличение содержания углерода в исходной шихте).

Совершенствование систем отвода и очистки газов из ДСП позволяет в значительной степени уменьшить капитальные и эксплуатационные расходы на очистку. Предложена методика расчета состава и объема газов ДСП в условиях увеличенной топливной нагрузки в этих печах.

Одним из направлений научной работы кафедры является исследование процессов газодинамики, смешения, горения и теплообмена в печах с использованием струйных потоков. Разработаны теплотехнические основы импульсно-скоростного нагрева металла, нагрева металла при сжигании топлива на его поверхности. Ведутся работы по разработке нефутерованных нагревательных устройств и печей с твердо-газовой футеровкой. Разработаны общие виды устройств струйного типа для подогрева газов, в частности, азота.

Проводятся исследования процессов гидродинамики и тепломассообмена в печах с барботажным слоем. Установлены два квазистационарных режима истечения газа из заглубленной фурмы: пузырьковый и струйный и условия перехода от одного режима к другому. Установлены значения определяющих конструктивных и режимных параметров, обеспечивающие максимальную интенсивность процессов тепло- и массообмена в печи. Изучены вопросы брызгообразования и поведения брызг в надслоевом пространстве печи. Установлена причина возникновения вибраций печей с барботажным слоем, изучены и описаны параметры этих вибраций и разработаны методы их подавления. Разработана методика конструктивного расчета печей с барботажным слоем при их работе в автогенном и неавтогенном режиме, решена задача о свободно-конвективном перемешивании ванны в печах с барботажным слоем. Показано, что именно этот механизм является определяющим в процессах перемешивания.

Кафедра выполнила большой объем научно-исследовательской, опытно-конструкторской работы в рамках гранта по постановлению № 218 Правительства РФ (объем финансирования 150 млн. рублей). Результатом выполнения программы гранта явились создание сквозной энергосберегающей технологии термообработки ответственных изделий атомной энергетики на основе энергоэффективного оборудования на базе машиностроительного завода «ЗиО-Подольск». Разработана, в частности, сквозная информационно-управляющая система термообработки, включая математическое, программное и техническое обеспечение. Построены и пущены в эксплуатацию печь малоокислительного нагрева изделий с аэродинамическим разделением стадий сжигания топлива, печь высокоточного нагрева с внешней механизацией.

С использованием автономного регистратора температурных полей в рабочем пространстве печи и нагреваемом металле печей прокатного производства проводится промышленный эксперимент по исследованию динамики нагрева заготовок с выработкой рекомендаций по

коррекции тепловых режимов печей. Эти исследования актуальны, в частности, для печей, построенных по проектам зарубежных фирм.

Проводится цикл работ по исследованию рациональных режимов охлаждения непрерывно литых заготовок из сталей ответственного назначения с целью снижения брака по трещинообразованию.

Краткий обзор научной работы кафедры теплофизики и экологии металлургического производства НИТУ «МИСиС» в определенной степени иллюстрирует и подтверждает высказывание великого В. Е. Грум-Гржимайло, приведенное в начале этой статьи. И следует дополнить, что нет пределов в развитии любой теории, так же как и разработке новых, более современных теорий.

УДК 669.013

**В. Г. Лисиенко**

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ,

кафедра «Автоматика», г. Екатеринбург, Россия

## ОТ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПЕЧЕЙ К СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

### Аннотация

*Рассмотрено развитие теоретических основ энерготехнологий, начиная с гидравлической теории печей В. Е. Грум-Гржимайло до современной теории интегрированного энергоэкологического анализа. Изложены достижения в области энергоэкологического анализа и тепломассообменного анализа (математического моделирования) в основном в рамках уральской научной школы. Приведены также примеры некоторых практических приложений.*

*Ключевые слова: теоретические основы, энерготехнологии, гидравлическая теория печей, интегрированный энергоэкологический анализ.*

### Abstract

*The development of theoretical basics of energy-technologies from hydraulic furnaces theory of V. E. Grum-Grgimailo to modern theory of integral energy-ecological analysis is considered. The advances in area of energy-ecological analysis and heat- and mass exchange analysis (mathematical modeling) essentially in the frame work of Ural scientific school are set out. The examples of some practical applications also are demonstrated.*

*Keywords: theoretical basics, energy-technologies, hydraulic furnaces theory, integral energy-ecological analysis.*

В предыдущих материалах показана в нашем представлении цепочка развития теории печей и энерготехнологических агрегатов, начиная с гидравлической теории печей